

ガン効果機能デバイスの研究

著者	柳沢 真太郎
号	514
発行年	1980
URL	http://hdl.handle.net/10097/11463

氏 名	やなぎ さわ しん た ろう 柳 沢 真 太 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 55 年 11 月 12 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 40 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	ガン効果機能デバイスの研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 西沢 潤一 東北大学教授 柴田 幸男 東北大学教授 御子柴宣夫

論 文 内 容 要 旨

ガン効果機能デバイスは、高速性、デバイス構成の単純性等の特徴に注目され、早くから研究が進められてきた。しかし、同じ原理に基づくガンダイオードが、マイクロ波及びミリ波発振器としてすでに広く実用に供されているのに対し、その実用化は立遅れている。これは、機能デバイスが、発振器に比べて高電界ドメインの、より精密な制御を必要とし、そのため材料となる GaAs 結晶及びデバイス設計、製作技術に、より完全かつ高度なものが要求されることに大きな原因があると考えられる。従来の機能デバイスに関する研究の多くは、高電界ドメインのもつ多岐にわたる機能作用がデバイス動作に応用出来ることを理論的に示し、かつ実験的にその可能性を確認するという段階に留まっており、実用化を意図した場合に解決を要する問題に関しては、未だ十分な検討は行なわれていない。

本研究は、主として、ガン効果機能デバイスの実用化を推進する上で障害となる問題を取り上げて検討し、問題解決のため必要な多くの提案を行ない、その有効性を実験的に確かめたものであり、そのような過程で得られた成果をもとに、実用化にとって不可欠なデバイスの直流動作化及び集積化を実現した結果について述べる。

まず、デバイスの基本的特性を明らかにするため、モンテカルロ法を用いて、ドメインの生成、走行、消滅の過程をシミュレーションした。シミュレーションに際しては、実空間を 1 次元、運動量空間を 3 次元とする現実に即したモデルを立て、セルフスキッピング機構を導入して、

計算時間の短縮を図った。その結果、電子濃度の均一な素子では、電圧印加後、第1周期目に accumulation 層が形成されることがわかった。その際、カソード附近に depletion 層が生じ、これがトリガとなって第2周期目以降、dipole ドメインの生成、走行が繰り返される。また、カソード附近にノッチを設けた素子では、第一周期から、dipole ドメインが生成、走行し、nl積が $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ の時ドメインの立上り時間は、約 4 psec、電流落ち込み率は、約40%となることがわかった。

次にデバイスの直流動作特性に大きな影響を与える GaAs エピタキシャル結晶中の深い不純物準位を評価する方法について検討した。深い準位の濃度は、ショットキー接合における C-V 特性の時間依存性から求められるが、それに関する従来の理論は、深い準位が不均一に分布している場合に対しては適用出来ない。そこで、従来の理論を、より一般化した形に書き改め、これに基づいて不均一な濃度分布を測定する方法を確立した。即ち、不均一な半導体中の深い準位の濃度分布 $N_T(x)$ を積分表示することによって平均化し、距離 x とは独立な量 \bar{N}_T に変換する。これを用いて、C-V 特性の時間依存性を表わす式を導出し、 \bar{N}_T と測定可能量との関係を求める。実際の濃度分布 $N_T(x)$ は、測定によって得られた \bar{N}_T を多項式で近似し、これを微分することによって決まる。 \bar{N}_T の具体的な測定法として、接合容量 C をパラメータとし、逆電圧 V の時間依存性を求めるという方法を用いた。図1に、半絶縁性 GaAs 基板上にエピタキシャル成長させた n 型 GaAs に、以上の方法を適用して得られた浅い準位及び深い準位の濃度分布を示す。深い準位が、基板界面で極大となるような形に分布していることがわかる。

デバイス製作上の問題として、微細パターン形成法及びショットキーゲート電極の耐熱性をとり上げて検討した。基板表面には、活性層分離のために、5 μm 以上の段差が生じている。従って、SiIC の製作に用いられる通常のフォトリソグラフィ工程をそのままの形で本デバイスの製作に適用した場合、パターン精度が著しく落ちる。そこで、GaAs のエッチングの異方性を利用して、段差とは無関係に微細パターンを形成出来る新しい方法を提案した。図2に示した製作工程から明らかなように、パターンを最初に平坦なウエハ面上で形成し、最後に活性層分離のためのメサエッチを行なうため、パターン精度が段差部で損われることがない。以上の方法によって製作した集積化回路の SEM 写真を図3に示した。

また、Al 及び Ti と GaAs とのショットキー接合の特性の熱処理依存性を検討し、これによって、ショットキーゲート電極の最適製作条件を確立した。

次に、2 端子素子及びショットキーゲート付 3 端子素子の動作特性について実験的に検討した。まず、デバイス設計の際に必要な活性層形状と動作特性との関係を求め、活性層厚みが薄くなると、電極形状効果により、ドメインがアノードで停留し、正常な特性が得られなくなることを明らかにした。直流印加時には、アノード電極近傍に定常高電界層が生じ、素子の直流動作特性を劣化させる大きな原因になっているが、このような高電界層は、電圧印加後ある時定数をもって生じる。そこで、この時定数の印加電圧依存性、温度依存性を測定した結果、室温で数百 μsec の値をもち、印加電圧の増加と共に減少することを見出した。また、活性化エネルギー 0.48 \pm 0.05 eV を得た。これは、高バイアス電界下で深い準位に電子が捕獲され、その結果、活性層内

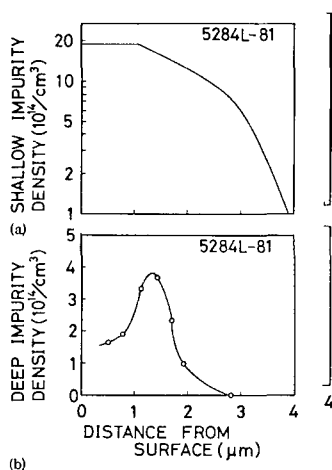


図1. 半絶縁性基板とn型GaAsエピタキシャル層との界面近傍における浅い不純物単位の濃度分布(a), 及び深い不純物単位の濃度分布(b)

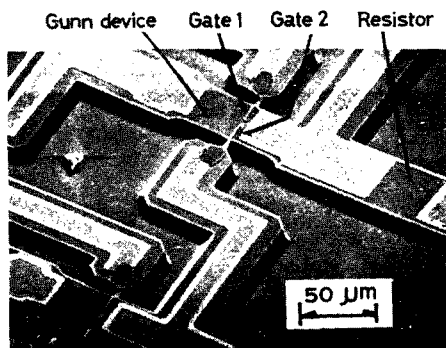


図3. 図2に示した工程により製作したショットキーゲート付素子のSEM写真

に負の空間電荷が蓄積されたことによるものと解釈される。また、図4に示したように、ショットキーゲート付素子のトリガ電圧がトリガレートと共に増加する現象を見出したが、これは、ドメインのもつ高電界によって電子捕獲現象が促進され、その結果、活性層内の電界分布がある時定数をもって変化すると解釈することによって説明出来る。ここで実験的に得られた時定数

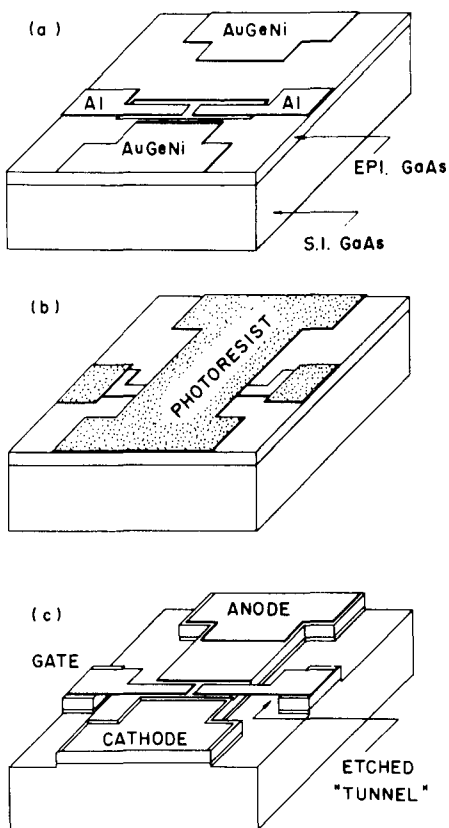


図2. ショットキーゲート付素子の製作工程：平坦なエピタキシャルウェーハ面上に、オーム電極パターン及びショットキー電極パターンを形成し(a), 次に、メサエッチに対する保護マスクをフォトリソにより形成する(b), 最後に、メサエッチを行い、活性層を分離する(c)

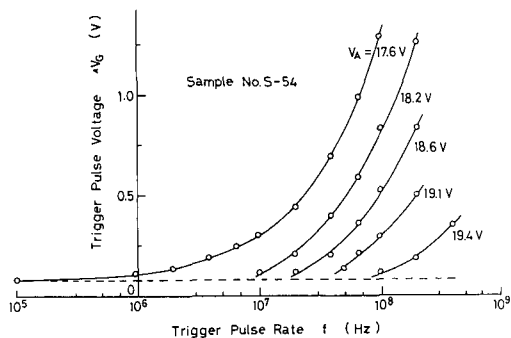


図4. アノード電圧をパラメータとしたショットキーゲート付素子のトリガ特性

は、前に求めたアノードでの高電界層形成時の時定数とほぼ同じ値、同じ活性化エネルギーをもっており、直流印加時における異常な特性が、いずれも深い準位による電子の捕獲、放出現象に起因していることを示している。以上のような電界の集中を抑えて、素子の安定な直流動作を実現するために、素子構造の改良に関する幾つかの提案を行なった。即ち、基板と活性層の間にバッファ層を設け、深い準位の濃度を減らす方法、アノード電極をショットキー型とし、活性層内に正孔を注入することによって負の空間電荷を中和する方法及びゲート電極直下の活性層にノッチを設け、電界の集中に対して実効的に負のフィードバックをかけて高電界層の形成を抑える方法の3つを検討した。いずれの方法も特性改善に効果のあることを確認したが、特性の再現性、製作の容易さ等の点から、最後に述べた方法が最も実用的であることがわかった。図5に、ノッチの深さをパラメータとした場合のトリガ電圧のトリガレート依存性を示した。ノッチの深さの増加と共に顕著に特性が改善されるが、最適なノッチ深さは、電流落ち込み率との兼ね合いで決まる。

最後に、ショットキーゲート付素子と負荷抵抗のみで構成される実用的なシフトレジスタ回路を提案し、先に述べた製作工程を適用して、これを1チップに集積化した。図6にシフトレジス

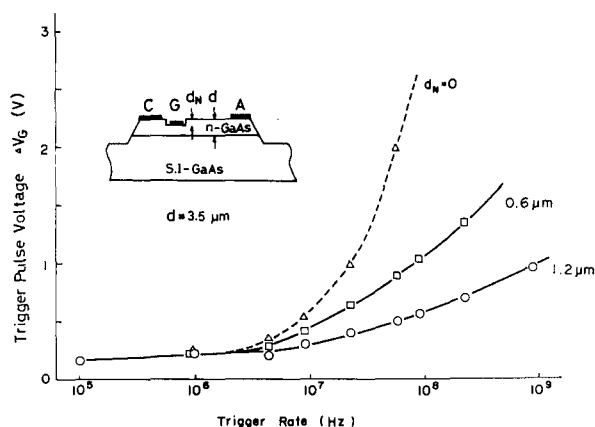


図5. ゲートノッチ構造をもつショットキーゲート付素子のトリガ特性（ノッチ深さ d_N をパラメータとした）

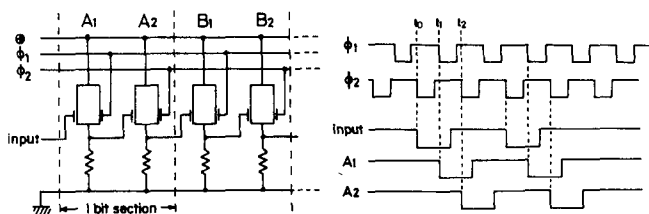


図6. デュアルショットキーゲート付素子と負荷抵抗で構成されるシフトレジスタ回路とそのタイミングチャート

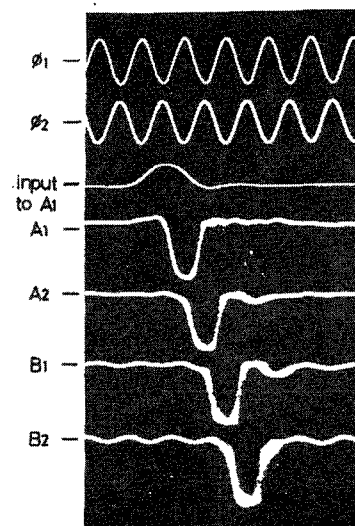


図7. シフトレジスタ動作波形（クロックレート 2.7 GHz）
縦軸：2 mA/div
横軸：250 ps/div

タ回路とそのタイミングチャートを示す。レーシング防止のため、互に逆位相のクロックパルス ϕ_1 , ϕ_2 を用いた。ショットキーゲート付素子に AND 動作を行なわせると、図に示したように、素子当り半クロックずつドメインパルスがシフトする。先に述べたゲートノッチ構造を採用することにより、クロックレート 2.7 GHz で安定な直流動作を行なわせることが出来た。図 7 にその動作波形を示す。図中の記号は、図 6 の記号と対応している。本レジスタを基本回路として用いることにより、PCM 中継器等のパルス処理装置をガン効果デバイスのみで構成することも可能である。

以上、ガン効果機能デバイスを集積化し、その安定な直流動作を実現するという本研究の所期の目的をほぼ達成することが出来た。

審 査 結 果 の 要 旨

GaAs などの半導体結晶の中では、電子が大きな運動エネルギーを持つと速度が低下するという現象がある。その結果、電子の密度が低い部分ができると、その領域ドメインは消滅せずに結晶中を移動して電界加速の方向に抜ける。これをガン効果と呼ぶ。このガン効果の高速性を利用して、高速論理回路を形成しようとする試みは一時相当大きな傾向であった。本研究は、ガン効果高速論理デバイスの研究に従事して得られた結果をまとめたもので、本文8章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、本デバイスの持つ特徴についてのべ、第3章では、形成されるドメインの性質を計算機を用いて計管推定した結果についてのべてあり、条件によって数十ピコ秒程度のパルス出力が期待できることを示している。

第4章では、使用するGaAs結晶中に存在して特性を劣化させる深い不純物準位の密度と種類を知ることが再現性を高める上で重要であることを指摘し、パルスを用いた測定法を単純化して90°の位相差のある二つの電流成分を測定する新しい測定法を開発して、本研究遂行上の基礎技術の展開の評価手段を得たことをのべている。

第5章では、本機能デバイス実現上不可欠であった特殊加工技術の開発に関してのべている。すなわち、段差のある結晶表面上に配線を蒸着する方法、二つの電気配線を大気空間で立体交差するように形成する方法、更に、電気及び機械的に安定なGaAs表面への金属接着の方法などについて得た成果についてのべている。Tiを接着するときに、熱処理温度が重要であって345°Cが適当であることを示し、またオージェ電子分光法によってその機構について論じ、またそれがAl蒸着より有効な方法であることを示したのは重要な知見である。

第6章は、上記の技術を駆使して基礎スイッチデバイスを実現し動作させたときの測定結果についてまとめたものである。その結果、ほぼ予想通り100ピコ秒程度のパルス動作をすること、スイッチのためのエネルギーはピコジュールの桁であることを示している。第7章は、更に論理回路デバイスを試作して実測した結果についてまとめたものである。第8章は結論である。

以上要するに、本論文はGaAs結晶を用いてガン効果による論理回路デバイスの実用の可能性を検討するための基礎特性の測定を行った研究結果をまとめたもので、そのための困難な基礎的技術の展開も行って、多くの知見を加え、半導体工学、電子回路工学に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。